第 39 卷 第 5 期
2022 年 10 月

应 用 力 学 学 报
Chinese Journal of Applied Mechanics

Vol. 39 No. 5
Oct. 2022

文章编号:1000-4939(2022)05-0869-10

卸载效应对节理裂隙岩体内应力波能量耗散影响研究

王梦,范立峰

(北京工业大学城市建设学部,100124 北京)

摘 要:研究了考虑宏观节理卸载效应的节理裂隙岩体内应力波的能量耗散规律,综合分析了细观裂隙和具有不同加卸载变形特性的宏观节理对应力波传播的影响。首先,研究了 5 种波形入射波(方形波、半正弦波、三角形波、左三角形波和右三角形波)在节理裂隙岩体内的能量透射特性;其次,比较了考虑卸载效应与不考虑卸载效应的应力波能量透射特性的差异;最后,讨论了入射波波形、传播距离和入射波幅值对能量透射系数的影响,并进一步揭示了入射波波形、传播距离和入射波幅值对考虑与不考虑卸载效应的能量透射系数差异的影响。研究结果表明:考虑卸载效应的能量透射系数总是小于不考虑卸载效应的能量透射系数。另外,节理裂隙岩体内方形波的能量透射系数最大,右三角形波的能量透射系数最小;方形波的能量透射系数差异最小,左三角形波的能量透射系数差异最大。能量透射系数随着传播距离的增加而减小,随着入射波幅值的增加而增大;能量透射系数差异随着传播距离的增加而增大,随着入射波幅值的增加而减小。

关键词:卸载效应;细观裂隙;宏观节理;应力波传播

中图分类号:TU45 **文献标志码:**A **DOI:**10.11776/j.issn.1000-4939.2022.05.007

The influence of macrojoint unloading effect on the stress waves energy dissipation in rock masses with microdefects and macrojoints

WANG Meng,FAN Lifeng

(College of Architecture and Civil Engineering,Beijing University of Technology,100124 Beijing,China)

Abstract: The energy dissipation of stress wave propagation through rock masses with microdefects and macrojoint considering unloading effects was investigated. The combined effects of microdefects and macrojoints with different unloading and loading models on stress wave propagation were considered. First, the transmission properties of five waveforms of incident waves (rectangular wave, half-sinusoidal wave, triangular wave, left-triangular wave and right-triangular wave) propagating through the rock masses with microdefects and macrojoint were analyzed. Then, the differences in the energy transmission properties of stress waves propagating through rock masses with microdefects and macrojoint considering unloading

收稿日期:2022-08-15 **修回日期:**2022-09-22
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 12172019);北京市杰出青年基金资助项目(No. JQ20039)
通信作者:范立峰。E-mail: fanlifeng@bjut.edu.cn
引用格式:王梦,范立峰. 卸载效应对节理裂隙岩体内应力波能量耗散影响研究[J]应用力学学报,2022,39(5):869-878.
WANG Meng,FAN Lifeng. The influence of macrojoint unloading effect on the stress waves energy dissipation in rock masses with microdefects and macrojoints[J]. Chinese journal of applied mechanics,2022,39(5):869-878.

effects and those not considering unloading effects were compared. Finally, the effects of propagation distance and incident wave amplitude on the energy transmission coefficient were discussed. The effects of propagation distance and incident wave amplitude on the difference of energy transmission coefficient with and without considering unloading effect were further revealed. The results show that the energy transmission coefficient considering unloading effect is always smaller than the energy transmission coefficient not considering unloading effect. In addition, the energy transmission coefficient of the rectangular wave is the largest while the energy transmission coefficient of the right-triangular wave is the smallest. The difference of energy transmission coefficient of the rectangular wave is the smallest whereas the difference of energy transmission coefficient of the left-triangular wave is the largest. The energy transmission coefficient decreases with the increase of propagation distance but increases with the increase of incident wave amplitude. The difference of energy transmission coefficient increases with the increase of propagation distance and decreases with the increase of incident wave amplitude.

Key words: unloading effect; microdefect; macrojoint; stress wave propagation

天然岩体中广泛存在着不同尺度的不连续结构面,例如细观裂隙和宏观节理,这些不连续结构面都会影响应力波的传播。细观裂隙会导致应力波幅值衰减和波形弥散[1-2],宏观节理会导致应力波的透射和反射[3-6]。由于细观裂隙和宏观节理对应力波传播的影响机理不同,难以建立统一的模型来分析细观裂隙和宏观节理对应力波传播的影响。此外,宏观节理在动荷载作用下的加载变形路径和卸载变形路径通常是不同的,卸载效应对应力波能量耗散的影响是不可忽略的[7-11]。研究考虑卸载效应的节理裂隙岩体内应力波的能量耗散规律有助于岩体工程中荷载能量的评估。

目前,岩体内应力波的传播已经得到了广泛研究。通常,位移不连续模型被用于研究应力波在宏观节理处的透射特性和反射特性[12-13],该模型假设宏观节理两侧的应力是相等的,而由于宏观节理的变形,宏观节理两侧的位移是不相等的[14]。根据宏观节理的力学特性可将宏观节理的变形分为线性变形和非线性变形。Schoenberg[15]针对线性变形宏观节理建立了线性位移不连续模型,推导了任意入射角度下应力波透射系数和反射系数的解析解。另外,Bandis-Barton(BB)模型作为一个双曲线函数被广泛用于描述宏观节理的非线性变形[16-17]。Zhao等[18]基于BB模型建立了宏观节理两侧的位移不连续关系,提出了非线性位移不连续模型,推导了非线性变形宏观节理处应力波传播的递推方程。随后,Zhao等[19]研究了多个平行非线性变形宏观节理对应力波传播的影响,进一步验证了非线性位移不连续模型的正确性。天然岩体中除了宏观节理,细观裂隙也会影响应力波的传播[20-22]。细观裂隙对应力波传播的影响机理和研究方法与宏观节理不同。细观裂隙在岩体中通常具有无序和高密度的特点。等效连续介质方法将细观裂隙岩体视为连续均匀的介质来研究应力波的传播,并且为了考虑应力波在细观裂隙岩体内传播的衰减特性和频率依赖特性,提出了等效黏弹性介质作为等效连续介质来研究细观裂隙岩体的动态力学特性[23-25]。研究等效黏弹性介质中应力波传播的方法主要有特征线方法和频谱分析方法。特征线方法是一种有限差分方法;频谱分析方法是一种傅里叶谐波分析方法。Fan等[26]提出了位移不连续模型与特征线相结合的方法,同时考虑了细观裂隙和宏观节理对应力波传播的影响,研究了节理裂隙岩体内应力波的传播特性。

在上述研究中,宏观节理的卸载变形被假设与加载变形是相同的。然而,实验研究表明,对于填充了一定量沙子或黏土的宏观节理,卸载变形路径与加载变形路径不一致[27]。卸载变形在宏观节理的整个变形过程中是不可忽略的,与加载变形相比较卸载变形表现出明显的滞后性[28]。Ma等[29]提出了一个三相介质模型来研究卸载行为对应力波传播的影响,其中宏观节理的卸载变形被视为是线性的。随后,引入了两组BB模型分别描述加载和卸载作用下宏观节理的变形特性[30],验证了非线性加载/卸载行为对应力波传播的影响。研究结果表明,卸载效应对岩体内应力波传播特性的影响是不可忽略的。然而,由于多种复杂因素的影响,对考虑卸载效应的节理裂隙岩体内应力波的传播特性仍不甚了解。

本研究探讨考虑卸载效应的节理裂隙岩体内应力波的能量耗散规律。首先，分析了不同波形的入射波在考虑卸载效应的节理裂隙岩体内的传播，比较了考虑卸载效应和不考虑卸载效应对应力波透射特性的影响。然后，讨论了入射波波形、传播距离和入射波幅值对能量透射系数的影响，分析了入射波波形、传播距离和入射波幅值对能量透射系数差异的影响。

1　理论计算

1.1　考虑卸载效应的分离式三特征线方法

岩体内普遍存在宏观节理和细观裂隙等不连续结构面，不连续结构面影响岩体内应力波的传播。图 1(a)为宏观节理对应力波传播的影响。其中，宏观节理导致应力波发生透射和反射。图 1(b)为细观裂隙对应力波传播的影响。由于细观裂隙形状和分布的不规则性导致应力波发生散射，从而使透射波产生幅值衰减和波形弥散。因此，岩体中宏观节理和细观裂隙对应力波传播的影响是不可忽略的。

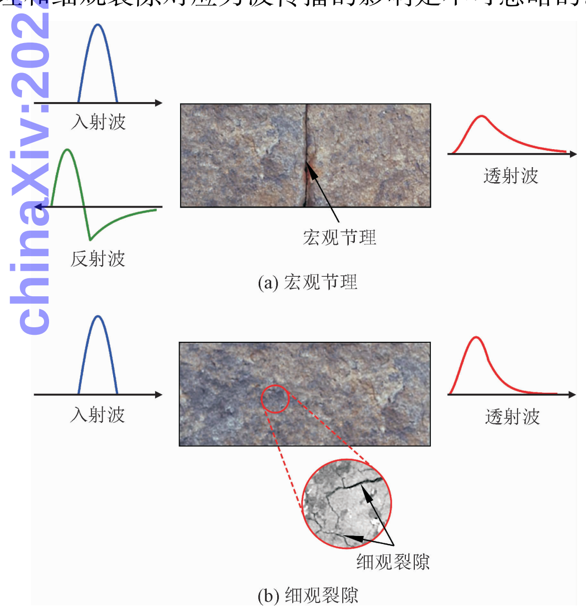


图 1　宏观节理和细观裂隙对应力波传播的影响

Fig. 1　Effect of macrojoint and microdefect on stress wave propagation

本研究同时考虑了岩体内宏观节理和细观裂隙对应力波传播的影响，引入了宏观节理的加卸载模型，建立了考虑卸载效应的节理裂隙岩体的代表单元。图 2 为考虑卸载效应的节理裂隙岩体内应力波传播的研究方案。图 2(a)为包含宏观节理和细观裂隙的节理裂隙岩体。节理裂隙岩体被等效为均匀不连续模型如图 2(b)所示。均匀不连续模型中通常采用等效黏弹性模型研究细观裂隙岩体内应力波的传播特性，通过将应力波在等效黏弹性介质内传播的特性等价为应力波在实际含细观裂隙的岩体内的传播特性，来建立细观裂隙岩体与应力波幅值衰减和应力波传播速度的关系。图 2(b)中的等效黏弹性模型由 Maxwell 单元与弹簧并联组成。另外，采用位移不连续模型研究宏观节理处应力波的传播特性。位移不连续模型中位移不连续条件可由宏观节理的变形特性确定。在传统研究中，宏观节理的卸载变形被假设与加载变形是相同的，即不考虑卸载效应对应力波传播的影响。在本研究中，为了考虑卸载效应对应力波传播的影响，引入了宏观节理的加载模型和卸载模型，其中宏观节理的加载变形特性与卸载变形特性不同，如图 2(c)所示。另外，图 2(d)中比较了考虑卸载效应与不考虑卸载效应时节理裂隙岩体内透射波的差异，从图 2(d)中可以看到卸载效应对透射波能量的影响是不可忽略的。本研究基于应力波传播理论分析了节理裂隙岩体内卸载效应对应力波能量耗散的影响。

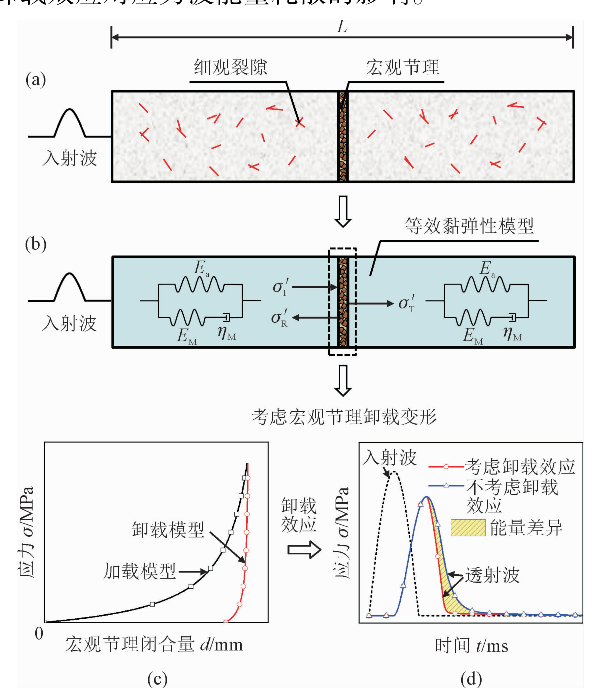


图 2　考虑卸载效应的节理裂隙岩体内应力波传播的研究方案

Fig. 2　Scheme for the investigation of stress wave propagation in rock masses with microdefects and macrojoint considering unloading effects

基于图 2(b)中的均匀不连续模型建立了包含

三族特征线的分离式三特征线方法[31]。

第一族特征线和对应的特征相容关系分别为

$$\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}=\sqrt{\frac{E_a+E_M}{\rho_0}}=C_V \tag{1}$$

$$\mathrm{d}v=\frac{1}{\rho_0 C_V}\mathrm{d}\sigma+\frac{(\sigma-E_a\varepsilon)E_M}{(E_a+E_M)\eta_M}\mathrm{d}x \tag{2}$$

其中：ε 为岩石质点应变；σ 为岩石质点应力；t 为应力波传播时间；ρ_0 为岩石密度；v 为岩石质点速度；x 为沿着应力波传播路径的笛卡尔坐标；C_V 为岩石波速；E_M 为 Maxwell 单元中弹簧的弹性系数；η_M 为 Maxwell 单元中黏壶的黏性系数；E_a 为与 Maxwell 单元并联的弹簧的弹性系数。

第二族特征线和对应的特征相容关系分别为

$$\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}=-\sqrt{\frac{E_a+E_M}{\rho_0}}=-C_V \tag{3}$$

$$\mathrm{d}v=-\frac{1}{\rho_0 C_V}\mathrm{d}\sigma+\frac{(\sigma-E_a\varepsilon)E_M}{(E_a+E_M)\eta_M}\mathrm{d}x \tag{4}$$

第三族特征线和对应的特征相容关系分别为

$$\mathrm{d}x=0 \tag{5}$$

$$\mathrm{d}\varepsilon=\frac{\mathrm{d}\sigma}{E_a+E_M}+\frac{(\sigma-E_a\varepsilon)E_M}{(E_a+E_M)\eta_M}\mathrm{d}t \tag{6}$$

根据式(1)、(3)和(5)可知，经(x,t)平面的任意点有 3 条特征线，即应力波在细观裂隙岩体内的传播可以用具有三族特征线的 x-t 平面来求解。另外，为了研究宏观节理处应力波的传播，假设三特征线中 $x=x_1$ 为宏观节理的位置，从而建立分离式三特征线方法，如图 3 所示。从图 3 中观察到分离式三特征线方法由三角形单元、菱形单元和分离式菱形单元组成。根据已知的边界条件和初始条件，可利用三角形单元来计算岩体左边界点的应力波，利用菱形单元来计算细观裂隙岩体内的应力波，利用分离式菱形单元用来计算宏观节理处的应力波，通过将宏观节理的加卸载模型引入到分离式菱形单元中来研究宏观节理的卸载效应对应力波传播的影响。

假设本研究中节理裂隙岩体的初始应力、初始速度和初始应变分别为

$$\sigma(x,t)=0,\quad 0<x\leqslant L,\quad t=0 \tag{7}$$

$$v(x,t)=0,\quad 0<x\leqslant L,\quad t=0 \tag{8}$$

$$\varepsilon(x,t)=0,\quad 0<x\leqslant L,\quad t=0 \tag{9}$$

其中 L 为应力波的传播距离。

另外，假设双尺度不连续的左侧承受动荷载，则边界条件为

$$\sigma=\sigma^*(0,t),\quad t\geqslant 0 \tag{10}$$

1.2 岩体内左边界点、细观裂隙岩体处和宏观节理处应力波的传播

当应力波在岩体内传播时，可以首先求解图 3 中 OA 特征线上的应力波传播，即求解 OA 特征线上的质点应力、质点速度和质点应变[31]。随后，可进一步求解图 3 中 AOt 区域的质点应力、质点速度和质点应变。对 AOt 区域的求解可分为对左边界点的求解和对内点的求解，其中对内点的求解包括对细观裂隙岩体处和宏观节理处的求解。

图 3 中的左边界特征线 Ot 上的质点应力可根据边界条件式(10)得到。另外，左边界特征线 Ot 上的质点速度和质点应变可根据图 3 中的三角形单元求解。例如左边界点 $P(0,j)$ 的质点速度 $v(0,j)$ 和质点应变 $\varepsilon(0,j)$ 可根据三角形单元中特征线 $P(0,j)$-$P(1,j-1)$ 和特征线 $P(0,j)$-$P(0,j-2)$ 对应的特征相容条件求得。

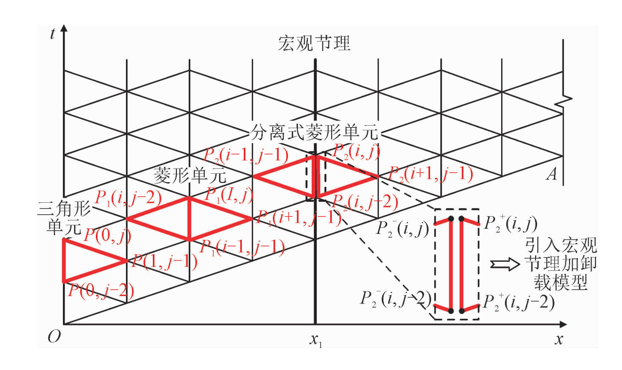


图 3 分离式三特征线方法[31]

Fig. 3 Split three characteristic lines method[31]

根据式(4)可获得三角形单元中特征线 $P(0,j)$-$P(1,j-1)$ 对应的特征相容条件为

$$v(0,j)-v(1,j-1)=-\frac{1}{\rho_0 C_V}[\sigma(0,j)-\sigma(1,j-1)]-\frac{[\sigma(1,j-1)-E_a\varepsilon(1,j-1)]E_M}{(E_a+E_M)\eta_M}\mathrm{d}x \tag{11}$$

根据式(6)可获得三角形单元中特征线 $P(0,j)$-$P(0,j-2)$ 对应的特征相容条件为

$$\varepsilon(0,j)-\varepsilon(0,j-2)=\frac{1}{E_a+E_M}[\sigma(0,j)-\sigma(0,j-2)]+\frac{[\sigma(0,j-2)-E_a\varepsilon(0,j-2)]E_M}{(E_a+E_M)\eta_M}2\mathrm{d}t \tag{12}$$

由于左边界特征线 Ot 上质点应力 $\sigma(0,j)$ 已知，将质点应力 $\sigma(0,j)$ 代入式(11)可获得左边界点

上的质点速度 $v(0,j)$，将质点应力 $\sigma(0,j)$ 代入式(12)可获得左边界点上的质点应变 $\varepsilon(0,j)$。

图 3 中细观裂隙岩体处的质点应力、质点速度和质点应变可根据菱形单元求解。例如细观裂隙岩体处点 $P_1(i,j)$ 的质点应力 $\sigma(i,j)$、质点速度 $v(i,j)$ 和质点应变 $\varepsilon(i,j)$ 可根据菱形单元中特征线 $P_1(i,j)$-$P_1(i-1,j-1)$、特征线 $P_1(i,j)$-$P_1(i+1,j-1)$ 和特征线 $P_1(i,j)$-$P_1(i,j-2)$ 对应的特征相容条件求得。

根据式(2)可获得菱形单元中特征线 $P_1(i,j)$-$P_1(i-1,j-1)$ 对应的特征相容条件为

$$v(i,j)-v(i-1,j-1)=\frac{1}{\rho_0 C_V}[\sigma(i,j)-\sigma(i-1,j-1)]+\frac{[\sigma(i-1,j-1)-E_a\varepsilon(i-1,j-1)]E_M}{(E_a+E_M)\eta_M}dx \tag{13}$$

根据式可获得菱形单元中特征线 $P_1(i,j)$-$P_1(i+1,j-1)$ 对应的特征相容条件为

$$v(i,j)-v(i+1,j-1)=-\frac{1}{\rho_0 C_V}[\sigma(i,j)-\sigma(i+1,j-1)]-\frac{[\sigma(i+1,j-1)-E_a\varepsilon(i+1,j-1)]E_M}{(E_a+E_M)\eta_M}dx \tag{14}$$

根据式可获得菱形单元中特征线 $P_1(i,j)$-$P_1(i,j-2)$ 对应的特征相容条件为

$$\varepsilon(i,j)-\varepsilon(i,j-2)=\frac{1}{E_a+E_M}[\sigma(i,j)-\sigma(i,j-2)]+\frac{[\sigma(i,j-2)-E_a\varepsilon(i,j-2)]E_M}{(E_a+E_M)\eta_M}2dt \tag{15}$$

根据式(13)和式(14)可获得细观裂隙岩体处的质点应力 $\sigma(i,j)$，将质点应力 $\sigma(i,j)$ 代入式(13)或式(14)可获得细观裂隙岩体处的质点速度 $v(i,j)$，将质点应力 $\sigma(i,j)$ 代入式(15)可获得细观裂隙岩体处的质点应变 $\varepsilon(i,j)$。

宏观节理处的应力波传播，可根据位移不连续模型计算得到。位移不连续模型由宏观节理处的应力连续条件和位移不连续条件组成。

宏观节理处应力连续条件为

$$\sigma^+(x_1,t)=\sigma^-(x_1,t)=\sigma(x_1,t) \tag{16}$$

另外，根据宏观节理的加卸载模型，可得宏观节理处的位移不连续条件为

$$u^+(x_1,t)-u^-(x_1,t)=d^{l/unl}=d_1^{l/unl}+\frac{\sigma^{l/unl}}{k_n^{l/unl}+\sigma^{l/unl}/d_{max}^{l/unl}} \tag{17}$$

其中：u 为宏观节理处质点位移；d 为宏观节理闭合量；d_1 为宏观节理初始闭合量；d_{max} 为宏观节理最大允许闭合量；k_n 为初始宏观节理刚度；上标“+”表示宏观节理后应力波传播的参数；上标“-”表示宏观节理前应力波传播的参数；上标“l”和“unl”分别表示加载模型和卸载模型对应的参数。

根据应力连续条件式(16)、位移不连续条件式(17)以及分离式菱形单元中特征线 $P_2^-(i,j)$-$P_2(i-1,j-1)$、特征线 $P_2^+(i,j)$-$P_2(i+1,j-1)$、特征线 $P_2^+(i,j)$-$P_2^+(i,j-2)$ 和特征线 $P_2^-(i,j)$-$P_2^-(i,j-2)$ 对应的特征相容条件，可求得图 3 中宏观节理处点 $P_2(i,j)$ 的质点应力 $\sigma(i,j)$、质点速度 $v(i,j)$ 和质点应变 $\varepsilon(i,j)$。

根据式(2)可获得分离式菱形单元中特征线 $P_2^-(i,j)$-$P_2(i-1,j-1)$ 对应的特征相容条件为

$$v^-(i,j)-v(i-1,j-1)=\frac{1}{\rho_0 C_V}[\sigma^-(i,j)-\sigma(i-1,j-1)]+\frac{[\sigma(i-1,j-1)-E_a\varepsilon(i-1,j-1)]E_M}{(E_a+E_M)\eta_M}dx \tag{18}$$

根据式(4)可获得分离式菱形单元中特征线 $P_2^+(i,j)$-$P_2(i+1,j-1)$ 对应的特征相容条件为

$$v^+(i,j)-v(i+1,j-1)=-\frac{1}{\rho_0 C_V}[\sigma^+(i,j)-\sigma(i+1,j-1)]-\frac{[\sigma(i+1,j-1)-E_a\varepsilon(i+1,j-1)]E_M}{(E_a+E_M)\eta_M}dx \tag{19}$$

根据式(6)可获得分离式菱形单元中特征线 $P_2^+(i,j)$-$P_2^+(i,j-2)$ 对应的特征相容条件为

$$\varepsilon^+(i,j)-\varepsilon^+(i,j-2)=\frac{1}{E_a+E_M}[\sigma^+(i,j)-\sigma^+(i,j-2)]+\frac{[\sigma^+(i,j-2)-E_a\varepsilon^+(i,j-2)]E_M}{(E_a+E_M)\eta_M}2dt \tag{20}$$

同样，根据式(6)可获得分离式菱形单元中特征线 $P_2^-(i,j)$-$P_2^-(i,j-2)$ 对应的特征相容条件为

$$\varepsilon^-(i,j)-\varepsilon^-(i,j-2)=\frac{1}{E_a+E_M}[\sigma^-(i,j)-\sigma^-(i,j-2)]+\frac{[\sigma^-(i,j-2)-E_a\varepsilon^-(i,j-2)]E_M}{(E_a+E_M)\eta_M}2\mathrm{d}t \quad (21)$$

联立式(16)~式(19)可得宏观节理两侧的质点应力为

$$\sigma(i,j)=\frac{2\mathrm{d}t\rho_0C_Vk(i,j)}{\rho_0C_V+4\mathrm{d}tk(i,j)}\times\left\{\frac{\sigma(i+1,j-1)+\sigma(i-1,j-1)}{\rho_0C_V}+\frac{\sigma(i,j-2)}{2\mathrm{d}tk(i,j)}+v(i+1,j-1)-v(i-1,j-1)-\frac{[\sigma(i+1,j-1)-E_a\varepsilon(i+1,j-1)]E_M}{(E_a+E_M)\eta_M}\mathrm{d}x-\frac{[\sigma(i-1,j-1)-E_a\varepsilon(i-1,j-1)]E_M}{(E_a+E_M)\eta_M}\mathrm{d}x\right\} \quad (22)$$

将式(22)代入式(18)~式(21)可分别求得宏观节理左侧的质点速度 $v^-(i,j)$ 和质点应变 $\varepsilon^-(i,j)$，以及宏观节理右侧的质点速度 $v^+(i,j)$ 和质点应变 $\varepsilon^+(i,j)$。综上，可获得考虑卸载效应的节理裂隙岩体内的透射波。

本研究引入能量透射系数 T_e 来研究考虑卸载效应的节理裂隙岩体内透射波的能量变化，能量透射系数 T_e 可表示为

$$T_e=\frac{\sum_{t_T^0}^{t_T^1}\rho_0C_V\sigma_T^2\Delta t}{\sum_{t_I^0}^{t_I^1}\rho_0C_V\sigma_I^2\Delta t} \quad (23)$$

其中：σ_T 为透射波；σ_I 为入射波；t_T^0 为透射波的起始时间；t_T^1 为透射波的终止时间；t_I^0 为入射波的起始时间；t_I^1 为入射波的终止时间。

另外，本研究引入能量透射系数差异 ΔT_e 来研究考虑卸载效应与不考虑卸载效应的节理裂隙岩体内应力波的能量透射系数差异，能量透射系数差异 ΔT_e 可表示为

$$\Delta T_e=\frac{|T_e^1-T_e^2|}{T_e^1} \quad (24)$$

其中：T_e^1 为考虑卸载效应的节理裂隙岩体内应力波的能量透射系数；T_e^2 为不考虑卸载效应的节理裂隙岩体内应力波的能量透射系数。

2　研究结果

本节分析了不同波形入射波垂直入射到节理裂隙岩体的能量透射规律，比较了考虑卸载效应与不考虑卸载效应的节理裂隙岩体内的透射波。在计算中，等效黏弹性模型的参数值分别为 $E_a=27.0$ GPa、$E_M=14.0$ GPa 和 $\eta_M=35.0$ MPa·s。岩石的密度为 $\rho_0=2\,500$ kg/m^3。加载模型中初始宏观节理刚度和最大允许闭合量分别为 $k_n^l=9.901$ GPa/m 和 $d_{max}^l=0.561$ mm。卸载模型中初始宏观节理刚度最大允许闭合量分别为 $k_n^{unl}=62.500$ GPa/m 和 $d_{max}^{unl}=0.059$ mm。另外，以半正弦波为例说明入射波的振幅为 $A_0=0.5$ MPa，入射波的频率为 $f_0=200$ Hz。

图4为5种波形入射波在节理裂隙岩体内传播的透射波。图4(a)~(e)中入射波波形分别为方形波、半正弦波、三角形波、左三角形波和右三角形波。另外，比较了考虑卸载效应与不考虑卸载效应的节理裂隙岩体内的透射波，并将图4中的入射波和透射波代入式(23)可分别求得5种波形入射波在节理裂隙岩体内传播的能量透射系数。

从图4(a)~(e)中可以看出，5种波形入射波在考虑卸载效应与不考虑卸载效应的节理裂隙岩体内传播，其透射波幅值都会发生衰减。对于同一种入射波波形，考虑卸载效应与不考虑卸载效应的透射波的衰减程度是相同的，并且透射波波形是相似的。然而，考虑卸载效应的透射波波形比不考虑卸载效应的透射波波形更窄。考虑卸载效应时透射波的能量透射系数小于不考虑卸载效应时透射波的能量透射系数，即考虑卸载效应时透射波的能量损耗比不考虑卸载效应时透射波的能量损耗多。

另外，从图4(a)和图4(d)可以看到，无论是否考虑卸载效应，方形透射波和左三角形透射波都出现了明显拐点。不同于方形透射波和左三角形透射波，从图4(b)、(c)和(e)可以看到，无论是否考虑卸载效应，半正弦透射波、三角形透射波和右三角形透射波都是光滑连续的。其次，通过比较方形波、半正弦波、三角形波、左三角形波和右三角形波的透射波，发现无论是否考虑卸载效应，方形透射波的能量透射系数是最大的。说明了无论是否考虑卸载效应，方形透射波在传播过程中的能量消耗比其他波形的能量消耗小。从图4(a)中可以看出，考虑卸载效应的方形透射波的能量透射系数为0.656 3，不考虑卸载效应的方形透射波的能量透射系数为0.730 2。另外，无论是否考虑卸载效应，右三角形透射波的能量透射系数是最小的。说明了无论是否考虑卸载效应，右三角形透射波在传播过程中的能量消耗比其

他波形的能量消耗大。从图 4(e)中可以看出，考虑卸载效应的右三角形透射波的能量透射系数为 0.508 9，不考虑卸载效应的右三角形透射波的能量透射系数为 0.645 6。

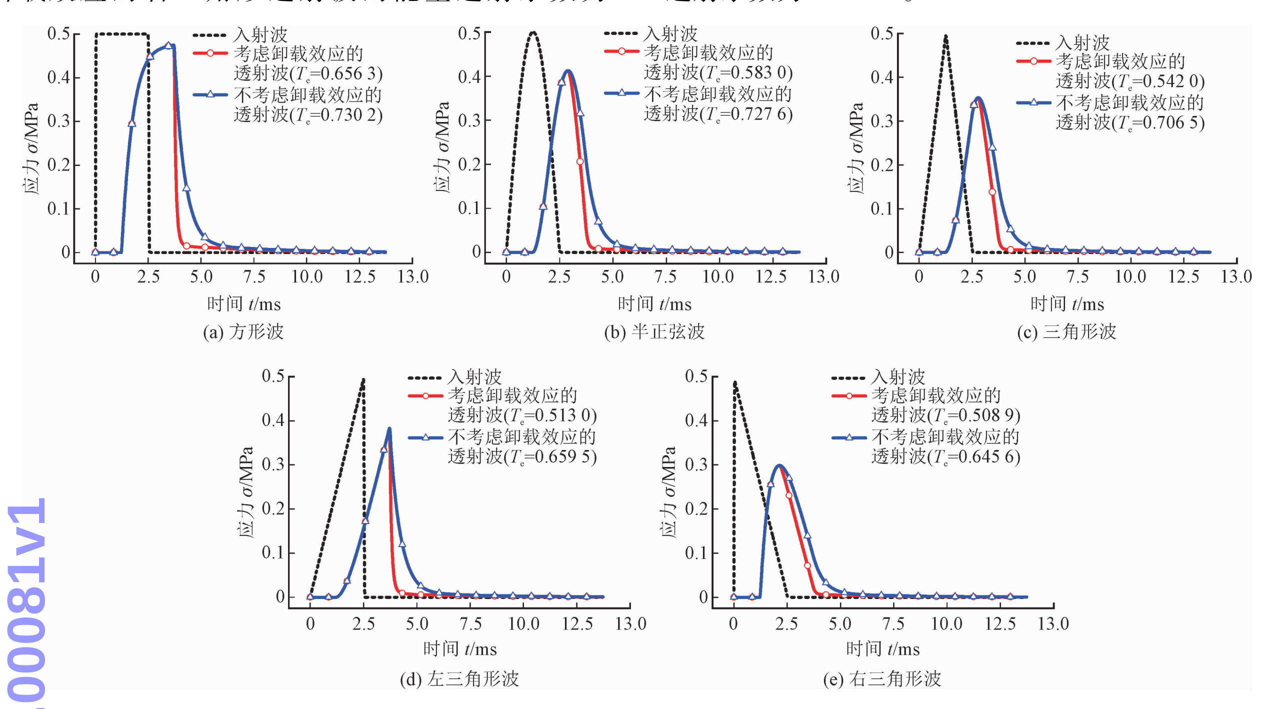


图 4　5 种波形入射波在节理裂隙岩体内传播的透射波

Fig. 4　Transmitted waves in rock masses with microdefects and macrojoints under five waveforms of incident waves

3　考虑卸载效应的节理裂隙岩体内透射波能量分析

3.1　入射波波形对能量透射系数和能量透射系数差异的影响

图 5(a)揭示了入射波波形对能量透射系数的影响，比较了节理裂隙岩体中考虑卸载效应的能量透射系数与不考虑卸载效应的能量透射系数。图 5(a)中入射波波形为方形波、半正弦波、三角形波、左三角形波和右三角形波。在计算中，入射波幅值固定为 A_0 = 0.5 MPa，传播距离固定为 L = 5 m。从图 5(a)中可以看出，5 种波形入射波中方形波的能量透射系数最大，右三角形波的能量透射系数最小。另外，无论是否考虑卸载效应，能量透射系数随方形波、半正弦波、三角形波、左三角形波和右三角形波是依次减小的。对于任意给定的入射波波形，考虑卸载效应的能量透射系数总是小于不考虑卸载效应的能量透射系数，说明了当考虑卸载效应时，应力波传播的能量消耗较大。从图 5(a)中也可以观察到，考虑卸载效应和不考虑卸载效应的能量透射系数始终小于 1.0，说明了应力波在传播过程中能量是衰减的。

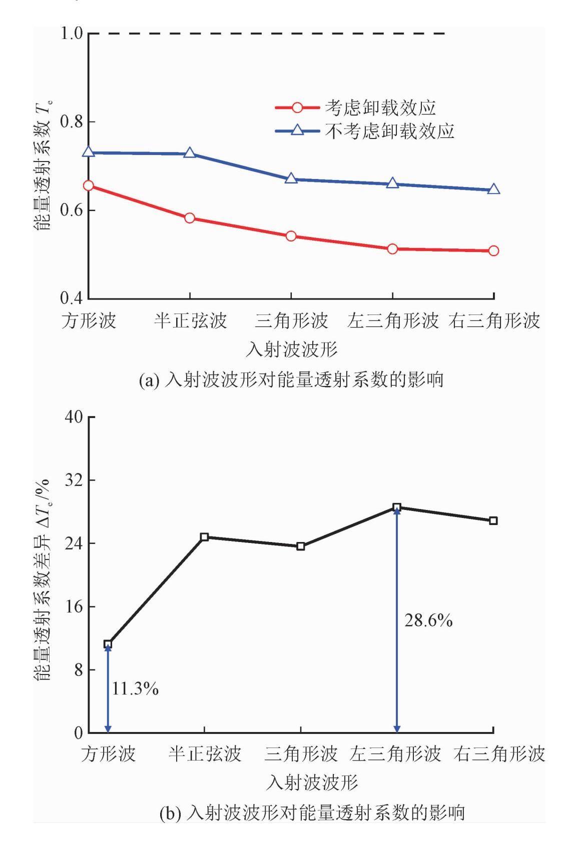


图 5　入射波波形对透射波能量的影响

Fig. 5　Effect of incident waveform on energy of transmitted wave

图 5(b)揭示了入射波波形对能量透射系数差异的影响。能量透射系数差异为节理裂隙岩体内考虑卸载效应和不考虑卸载效应时能量透射系数的差异。将图 5(a)中考虑卸载效应的能量透射系数和不考虑卸载效应的能量透射系数代入式(24),可求得图 5(b)中的能量透射系数差异。从图 5(b)中可以看出,不同入射波波形的能量透射系数差异是不同的,在 5 种入射波波形中方形波的能量透射系数差异最小,其能量透射系数差异为 11.3%,而左三角形波的能量透射系数差异最大,其能量透射系数差异为 28.6%。说明了卸载效应对方形波能量透射系数的影响是最小的,对左三角形波能量透射系数的影响是最大的。

3.2 传播距离对能量透射系数和能量透射系数差异的影响

图 6(a)揭示了不同入射波幅值下传播距离对能量透射系数的影响,并比较了节理裂隙岩体中考虑卸载效应的能量透射系数与不考虑卸载效应的能量透射系数。以半正弦波为例进行计算,入射波幅值 A_0 分别为 0.5 MPa、2.0 MPa 和 3.5 MPa。从图 6(a)中可以看出,考虑卸载效应和不考虑卸载效应的能量透射系数随着传播距离的增加而减小,这是由于考虑到岩体中细观裂隙对应力波传播的影响。岩体中细观裂隙密度一定的情况下,等效黏弹性模型不变,此时,传播距离越长,岩体中细观裂隙对应力波传播的影响越大,从而导致能量透射系数越小,应力波的能量消耗越大。另外,对于任意给定的传播距离,考虑卸载效应的能量透射系数总是小于不考虑卸载效应的能量透射系数。从图 6 (a)中也可以看出,对于任意给定的传播距离,无论是否考虑卸载效应,入射波幅值越大,能量透射系数越大。

图 6(b)揭示了不同入射波幅值下传播距离对能量透射系数差异的影响。入射波幅值 A_0 分别为 0.5 MPa、2.0 MPa 和 3.5 MPa。将图 6(a)中考虑卸载效应的能量透射系数和不考虑卸载效应的能量透射系数代入式(24),可求得图 6(b)中的能量透射系数差异。从图 6(b)中可以看出,随着传播距离的增加,能量透射系数差异线性增大。另外,对于任意给定的传播距离,不同的入射波幅值对应不同的能量透射系数差异,且入射波幅值越大能量透射系数差异越小。

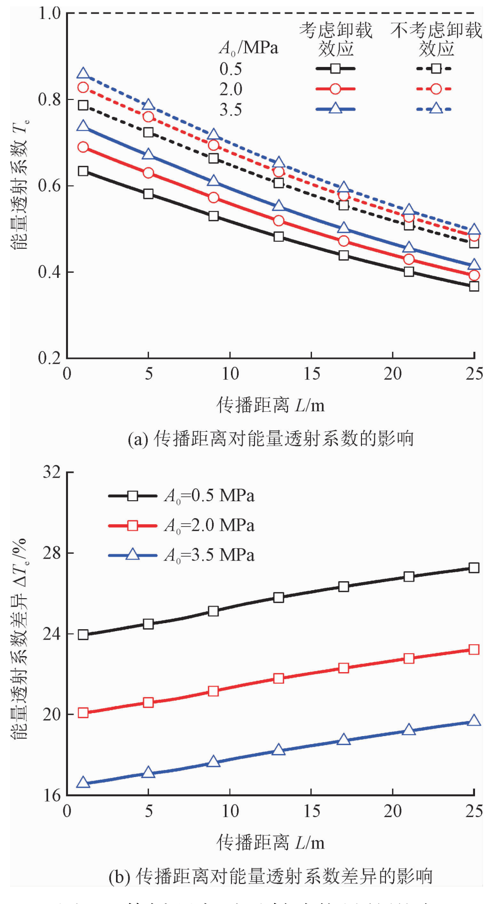


图 6 传播距离对透射波能量的影响

Fig. 6 Effect of propagation distance on energy of transmitted wave

3.3 入射波幅值对能量透射系数和能量透射系数差异的影响

图 7(a)揭示了不同传播距离下入射波幅值对能量透射系数的影响。其中,传播距离 L 分别为 1.0 m,10.0 m 和 20.0 m。从图 7(a)中可以看出,考虑卸载效应和不考虑卸载效应的能量透射系数随着入射波幅值的增加而增大。这是由于非线性变形宏观节理的刚度随着幅值的增加而增大,当入射波幅值足够大时,宏观节理对应力波传播的影响较小,此时节理裂隙岩体等同于只含有细观裂隙的岩体。从图 7(a)中还可以看出,随着入射波幅值的增加,能量透射系数先迅速增加后缓慢增加。另外,对于任意给定的入射波幅值,考虑卸载效应的能量透射系数总是小于不考虑卸载效应的能量透射系数。对于任意给定的入射波幅值,无论是否考虑卸载效应,传播距离越大,能量透射系数越小。

图 7(b)揭示了不同传播距离下入射波幅值对能量透射系数差异的影响。传播距离 L 分别为

1.0 m、10.0 m 和 20.0 m。将图 7(a)中考虑卸载效应的能量透射系数和不考虑卸载效应的能量透射系数代入式(24)，可求得图 7(b)中的能量透射系数差异。从图 7(b)中可以看出，能量透射系数差异随入射波幅值的增加而明显减小。另外，对于任意给定的入射波幅值，不同的传播距离对应不同的能量透射系数差异，且传播距离越大能量透射系数差异越大。

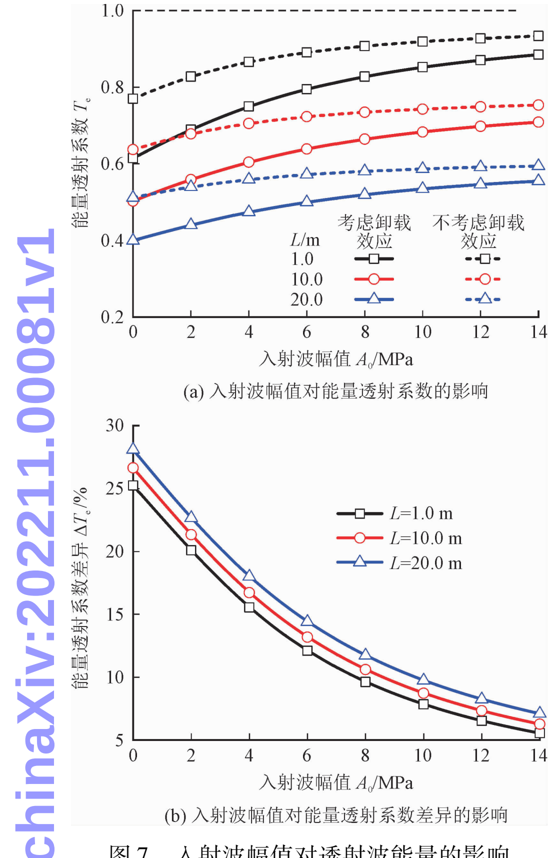


图 7 入射波幅值对透射波能量的影响

Fig. 7 Effect of incident wave amplitude on energy of transmitted wave

4 结 论

本研究探讨了考虑卸载效应的节理裂隙岩体内应力波传播的能量耗散规律，比较了不同入射波波形下考虑卸载效应与不考虑卸载效应的透射波，分析了入射波波形、传播距离和入射波幅值对能量透射系数的影响，并揭示了入射波波形、传播距离和入射波幅值对能量透射系数差异的影响。得出以下结论。

1）将宏观节理的加卸载模型引入到分离式三特征线方法中，可以有效地研究卸载效应对节理裂隙岩体内应力波传播的影响。

2）方形波的能量透射系数最大，右三角形波的能量透射系数最小。另外，方形波的能量透射系数差异最小，左三角形波的能量透射系数差异最大。

3）能量透射系数随着传播距离的增加而减小，随着入射波幅值的增加而增大。另外，能量透射系数差异随着传播距离的增加而增大，随着入射波幅值的增加而减小。

参考文献：

[1] ZHOU X F, FAN L F, WU Z J. Effects of microfracture on wave propagation through rock mass[J]. International journal of geomechanics, 2017, 17(9): 04017072.

[2] 牛雷雷，朱万成，李少华，等. 砂岩黏性对抗拉强度加载率效应影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2017，36(10)：2466-2473.
NIU Leilei, ZHU Wancheng, LI Shaohua, et al. Experimental investigation to effect of viscosity and loading rate on tensile strength of sandstone[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2017, 36(10): 2466-2473(in Chinese).

[3] ZHAO J, ZHAO X B, CAI J G. A further study of P-wave attenuation across parallel fractures with linear deformational behaviour [J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2006, 43(5): 776-788.

[4] LI Y, ZHU Z, LI B, et al. Study on the transmission and reflection of stress waves across joints[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2011, 48(3): 364-371.

[5] 柴少波，王昊，井彦林，等. 充填节理岩石累积损伤动力压缩特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2020，39(10)：2025-2037.
CHAI Shaobo, WANG Hao, JING Yanlin, et al. Experimental study on dynamic compression characteristics of rock with filled joints after cumulative damage[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2020, 39(10): 2025-2037(in Chinese).

[6] 闫亚涛，李建春. 节理粗糙度及吻合状态对岩体动态压缩特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2021，40(6)：1132-1144.
YAN Yatao, LI Jianchun. Experimental study on the influence of joint roughness and matching state on dynamic compression characteristics of rock masses[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2021, 40(6): 1132-1144(in Chinese).

[7] 吴顺川，高艳华，李永兵，等. 法向循环加卸载条件下节理力学特征研究[J]. 岩石力学与工程学报，2015，34(增刊 2)：3683-3693.
WU Shunchuan, GAO Yanhua, LI Yongbing, et al. A study of mechanical properties of joint under normal cyclic loading/unloading [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2015, 34 (S2): 3683-3693(in Chinese).

[8] LI J C, ZHAO X B, LI H B, et al. Analytical study for stress wave

interaction with rock joints having unequally close-open behavior [J]. Rock mechanics and rock engineering, 2016, 49(8): 3155-3164.

[9] LI J C, RONG L F, LI H B, et al. An SHPB test study on stress wave energy attenuation in jointed rock masses[J]. Rock mechanics and rock engineering, 2018, 52(2): 403-420.

[10] 薄英翌,王华宁. 蒋明镜. 深部节理岩体开挖卸荷动力破坏机制的离散元研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(2): 196-201.
BO Yingjun, WANG Huaning, JIANG Mingjing. Cracking mechanism of deep jointed rock mass induced by transient excavation via DEM[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2020, 42(2): 196-201(in Chinese).

[11] 苗胜军,刘泽京,赵星光,等. 循环荷载下北山花岗岩能量耗散与损伤特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(5): 928-938.
MIAO Shengjun, LIU Zejing, ZHAO Xingguang, et al. Energy dissipation and damage characteristics of Beishan granite under cyclic loading and unloading[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2021, 40(5): 928-938(in Chinese).

[12] 王卫华,李夕兵,左宇军. 非线性法向变形节理对弹性纵波传播的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1218-1225.
WANG Weihua, LI Xibing, ZUO Yujun. Effects of single joint with nonlinear normal deformation on P-wave propagation[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2006, 25(6): 1218-1225(in Chinese).

[13] LIU T T, LI X P, ZHENG Y, et al. Study on S-wave propagation through parallel rock joints under in situ stress[J]. Waves in random and complex media, 2020(2): 1-24.

[14] 宋林,闫玉湛,韩八晓,等. 非线性变形节理中纵波传播特性的理论研究[J]. 应用力学学报, 2012, 29(2): 133-140.
SONG Lin, YAN Yuzhan, HAN Baxiao, et al. Theoretical research into the wave propagation of P-wave across rock joint with nonlinear deformation[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2012, 29(2): 133-140(in Chinese).

[15] SCHOENBERG M. Elastic wave behavior across linear slip interfaces[J]. Journal of the acoustical society of America, 1980, 68(5): 1516-1521.

[16] BANDIS S C, LUMSDEN A C, BARTON N R. Fundamentals of rock joint deformation[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 1983, 20(6): 249-268.

[17] BARTON N, BANDIS S, BAKHTAR K. Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts, 1985, 22(3): 121-140.

[18] ZHAO J, CAI J G. Transmission of elastic P-waves across single fractures with a nonlinear normal deformational behavior[J]. Rock mechanics and rock engineering, 2001, 34(1): 3-22.

[19] ZHAO X B, ZHU J B, ZHAO J, et al. Study of wave attenuation across parallel fractures using propagator matrix method[J]. International journal for numerical and analytical methods in geomechanics, 2012, 36(10): 1264-1279.

[20] ITURRARAN-VIVEROS U, SANCHEZ-SESMA F J, LUZON F. Boundary element simulation of scattering of elastic waves by 3-D cracks[J]. Journal of applied geophysics, 2008, 64(3/4): 70-82.

[21] CHEN T, FEHLER M, FANG X, et al. SH wave scattering from 2-D fractures using boundary element method with linear slip boundary condition[J]. Geophysical journal international, 2012, 188(1): 371-380.

[22] WU Z, WONG L N Y, FAN L. Dynamic study on fracture problems in viscoelastic sedimentary rocks using the numerical manifold method[J]. Rock mechanics and rock engineering, 2013, 46(6): 1415-1427.

[23] NGUYEN S T, TO Q D, VU M N. Extended analytical solutions for effective elastic moduli of cracked porous media[J]. Journal of applied geophysics, 2017, 140: 34-41.

[24] NIU L L, ZHU W C, LI S, et al. Spalling of a one-dimensional viscoelastic bar induced by stress wave propagation[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2020, 131: 104317.

[25] FAN L F, YANG Q H, WANG M, et al. Equivalent viscoelastic behavior of high-temperature granite under seismic wave[J]. Rock mechanics and rock engineering, 2021, 55(2): 967-979.

[26] FAN L F, WANG M, WU Z J. A split three-characteristics method for stress wave propagation through a rock mass with double-scale discontinuities[J]. Rock mechanics and rock engineering, 2020, 53(12): 5767-5779.

[27] LI J C, MA G W. Experimental study of stress wave propagation across a filled rock joint[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2009, 46(3): 471-478.

[28] LI H, ZHOU T, DENG J H, et al. An excess stress model for capturing rate-dependent compressive behavior of rock joint and its validation and applications[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2020, 128: 104267.

[29] MA G W, LI J C, ZHAO J. Three-phase medium model for filled rock joint and interaction with stress waves[J]. International journal for numerical and analytical methods in geomechanics, 2011, 35(1): 97-110.

[30] FAN L F, WONG L N Y. Stress wave transmission across a filled joint with different loading/unloading behavior[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2013, 60: 227-234.

[31] FAN L F, WANG M, LI J C. Multiple pulses transmission through rock mass with double-scale discontinuities[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2021, 140: 104686.

（编辑 黄崇亚 张璐）